

Левкович М. Технологія зміцнення оброблених торцевих сферичних поверхонь / Левкович М., Бригадир Б. // Вісник ТНТУ. — 2012. — Том 65. — № 1. — С.110-115. — (машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки).

УДК 621.92.113

М. Левкович, канд. техн. наук; Б. Бригадир

Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя

## ТЕХНОЛОГІЯ ЗМІЦНЕННЯ ОБРОБЛЕНИХ ТОРЦЕВИХ СФЕРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

**Резюме.** Розглянуто питання технологічного методу забезпечення надійності внутрішніх напівсферичних поверхонь деталей машин. Досліджено процеси, що виникають при зміцненні внутрішніх сферичних поверхонь, виведено залежності для визначення залишкових напружень, що виникають у процесі зміцнення.

**Ключові слова:** зміцнення, сферична поверхня, контактне тертя, напруження, пластичне деформування.

M. Levkovych, B. Brugadur

## THE TECHNOLOGY OF STRENGTHENING THE TREATED FACED SPHERICAL SURFACES

**The summary.** The matters of technological method of providing the reliability of the internal semi-spherical surfaces of machine's details in regarded in the paper. The processes, which arise during the strengthening of spherical surfaces investigated, the dependency for estimation the remaining strains, which happen during the process of strengthening.

**Key words:** strengthening, spherical surface, contact friction, strain plastic deformation.

### Умовні позначення

$\mu$  – коефіцієнт пластичного тертя;

$\frac{\Delta H}{H}$  – величина відносного обтискування;

$\Psi$  – деформація в лунці;

$\sigma_s$  – границя текучості;

$H$  – нове число твердості;

$\tau_k$  – контактне граничне напруження;

$\sigma_{io} = \sigma_s$  – величина інтенсивності напруження в центральному, ідеально пластичному шарі металу;

$P_c$  – навантажувана сила;

$\varepsilon_i$  – довжина площадки текучості, що відповідає початку пластичного зміцнення в контактній поверхні деталі;

$h_i$  – товщина ідеального пластичного шару;

$d$  – діаметр бойка.

**Постановка проблеми.** Зміцнення деталей машин – одне з актуальних завдань технології машинобудування. В процесі виготовлення деталей машин використовують як конструктивні, так і технологічні методи зміцнення. Зупинимось на останніх.

У даний час відома велика кількість технологічних способів зміцнення деталей машин. Найпоширенішими технологічними методами зміцнення є пластична деформація поверхонь, термічна і хіміко-термічна обробки, наплавлення поверхонь, створення захисних зносостійких покриттів і зміцнених поверхневих шарів. Усі ці методи забезпечують ту чи іншу характеристику параметрів зміцненої поверхні:

твердості поверхневого шару, його глибини, структури. Використовується кожен з них окремо, або в поєднанні в різних технологічних процесах. Широке використання для зміцнення знайшло пластичне зміцнення шляхом поверхневого пластичного деформування (ППД). Новий спосіб ППД – статико-імпульсна обробка (СІО) за рахунок ряду додаткових конструктивно-технологічних параметрів дозволяє впливати на зміцнену поверхню керованими ударними імпульсами, які можуть формувати в широкому діапазоні необхідну глибину і ступінь зміцнення. Можливості СІО дозволяють створювати як рівномірно, так і гетерогенно зміцнений поверхневий шар оброблюваної деталі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Перспективність використання поверхневого пластичного деформування (ППД) для підвищення контактної витривалості в порівнянні з іншими методами зміцнення поверхні полягає в тому, що ППД дозволяє отримати: зміцнений поверхневий шар до 15 мм; збільшення мікротвердості відносно початкової складає в середньому близько 150% і досягає 6500 МПа; забезпечується плавний перехід між зміцненим поверхневим шаром і серцевиною. Обробними способами ППД може бути створена мала шорсткість зміцненої поверхні [1]. Відомі різноманітні методи зміцнення пластичним деформуванням широко досліджуються як закордонними, так і українськими науковцями [5, 6]. Зміцнення периферій заготовки здійснюється як за рахунок дії сил інструментів, так і за рахунок додаткового нагартування тертям, що виникає між інструментом і поверхнею заготовки. Виходячи з необхідності уточнення параметрів процесу зміцнення, були проведені дослідницькі роботи, результати яких подані нижче. Цікавим для зміцнення поверхневих шарів деталей машин є метод статико-імпульсної обробки, розроблений і запатентований А.В. Киричек, Д.Л. Соловйовим, А.Г. Лизуткіним [2–4]. Встановлено взаємозв'язок між конструктивними, конструктивно-технологічними та технологічними параметрами та їх вплив на показники якості поверхневого шару [5, 6, 7]. Однак у розглянутих працях не досліджені контактні сили тертя та їх вплив на залишкові напруження.

**Мета роботи.** Досягнення високої якості зміцнення сферичних поверхонь шляхом впливу зусиль статико-імпульсної обробки на залишкові напруження.

**Результати досліджень.** Статико-імпульсна обробка є новим видом обробки поверхневою пластичною деформацією шляхом підведення імпульсної енергії в зону деформації. На токарному верстаті деталь закріплюється в шпиндель, а інструмент встановлюють на місце різцетримача. Після цього пристрій підводять до оброблюваної поверхні із забезпеченням попереднього натягу, за рахунок якого зовнішні робочі поверхні бойків перебувають у стані статичного підтиску. Після цього вмикають імпульсний генератор, який через провідник імпульсів передає його на зовнішні робочі елементи інструмента, що формує динамічну складову сили деформації, яка інтенсифікує процес поверхневого пластичного деформування і зміцнює поверхневий шар оброблюваної поверхні.

Інструмент (деталь) обертається з високою швидкістю. Робоча частина деформуючих елементів при обробленні наносить численні удари, пластично деформуючи оброблювану поверхню і миттєво відскакують від неї. Крім удару деформуючі елементи за час контакту здійснюють вигладжування оброблюваної поверхні. Пластична деформація металу здійснюється керованою імпульсною дією, що забезпечується силою ударів системи бойків інструмента, що статично навантажений силою  $P_c$ . Використання статичного підтискування інструмента до оброблюваної поверхні дозволяє збільшити її площу контакту з інструментом, сприяючи зменшенню спотворень ударного імпульсу, що передається, і зменшуючи втрати енергії удару.

Оскільки деталь у процесі обробки обертається, то сила  $P_c$  створює контактні сили тертя.

Контактні сили тертя характеризуються величиною коефіцієнта пластичного тертя  $\mu$ , який можна визначити за формулою

$$\mu = \frac{\tau_k}{2k} = \frac{\sqrt{3}\tau_k}{2\sigma_s} = \frac{\sqrt{3}\tau_k}{2\sigma_{io}}. \quad (1)$$

Пластично деформуючи оброблювану поверхню деталі, змінюється її твердість. М.С. Дрозд [9] пропонує метод із використанням нового числа твердості  $H$ , яке за своїм фізичним змістом не є напруженням (дійсним або умовним), а модулем зміцнення матеріалу при втискуванні в нього сферичного індентора.

Якщо величину деформації записати

$$\psi = \left( \frac{\Delta H}{H} \right)_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{1 - 4\mu^2 \varepsilon_i} \quad (2)$$

та припустити, що  $\varepsilon_i$  – довжина площадки текучості, що відповідає початку пластичного зміцнення в контактній поверхні заготовки, то величину відносного обтиску  $\Delta H/H$  можна пов'язати з товщиною ідеального пластичного шару  $h_i$  співвідношенням

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\sqrt{3}}{2} \varepsilon_i \sqrt{1 - 4\mu^2 \frac{h_i^2}{H^2}}. \quad (3)$$

Використовуючи формулу (3), за заданою величиною довжини площадки плинності  $\varepsilon_i$  і величиною коефіцієнта пластичного тертя  $\mu$  можна розрахувати величину відносного обтискування  $\Delta H/H$ , яка відповідає відносній товщині ідеального пластичного шару  $h_i/H$ .

Розподіл напружень в ідеально пластичному шарі [3]

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \frac{4}{\sqrt{3}} \mu \frac{y}{H}, \quad \frac{\sigma_y}{\sigma_s} = -\frac{4}{\sqrt{3}} \mu \frac{x}{H} - \frac{\psi}{\sigma_s}, \\ \frac{\sigma_x}{\sigma_s} &= -\frac{4}{\sqrt{3}} \mu \frac{x}{H} + \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - 16\mu^2 \frac{y^2}{H^2}} - \frac{\psi}{\sigma_s}. \end{aligned} \quad (4)$$

Напруження, що виникає в зміцнюваних шарах заготовки,

$$\frac{\tau_{xy}}{\sigma_s} = \frac{4}{\sqrt{3}} \mu \frac{y}{H}, \quad \frac{\sigma_y}{\sigma_s} = -\frac{4}{\sqrt{3}} \mu \frac{x}{H} - \frac{d}{\sigma_s}, \quad \frac{\sigma_x}{\sigma_s} = -\frac{4}{\sqrt{3}} \mu \frac{x}{H} + \frac{\varphi(y)}{\sigma_s}. \quad (5)$$

де  $\varphi(y)$  – парна функція ординати  $y$ .

Для безперервності напружень  $\sigma_x$  на межах поділу ідеально пластичного і зміцненого шарів вимагається дотримання співвідношення

$$\frac{\varphi(\pm h_i/2 + \psi)}{\sigma_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - 4\mu^2 h_i^2 / H^2}. \quad (6)$$

Значення середньої величини навантажуваної сили  $P_c$  визначається за залежністю

$$\frac{P_c}{\sigma_s} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{h_i}{H} \sqrt{1 - 4\mu^2 \frac{h_i^2}{H^2}} + \frac{1}{2\sqrt{3}\mu} \arcsin\left(2\mu \frac{h_i}{H}\right) - \frac{d}{\sigma_s} + \frac{2}{H} \int_{k_i/2}^{H/2} \frac{\varphi(y) + \psi}{\sigma_s} dy \quad (7)$$

Залишкові напруження, які виникають після пластичного деформування заготовки, еквівалентні пластичним переміщенням з відрахуванням пружних деформацій, які можна визначити за теоремою про розвантаження.

На контурі деформованого матеріалу з центральним ідеально-пластичним шаром діють такі напруження:

$$\text{при } y = \pm \frac{H}{2} \quad \tau_{xy} = \pm \tau_k = \pm \frac{2}{\sqrt{3}} \mu \sigma_s, \quad \sigma_y = -\frac{2\tau_k}{H} x - d = -\frac{4}{\sqrt{3}} \mu \sigma_s \frac{x}{H} - \psi, \quad (8)$$

при  $x = 0$ ,  $\sigma_x = P_c$ .

Граничні умови (8) впливають з формул (1, 5). Цим умовам при  $V = 0,5$  відповідають такі значення напружень у кожній пружній кульці:

$$\frac{\tau_{xy}}{\sigma_s} = \frac{4}{\sqrt{3}} \mu \frac{x}{H}, \quad \frac{\sigma'_x}{\sigma_s} = -\frac{4}{\sqrt{3}} \mu \frac{x}{H} + \frac{P_c}{\sigma_s}, \quad \frac{\sigma_y}{\sigma_s} = -\frac{4}{\sqrt{3}} \mu \frac{x}{H} - \frac{\psi}{\sigma_s}. \quad (9)$$

Значення залишкових напружень у деформованій частині заготовки з ідеально-пластичними кульками в центрі отримаємо, віднімаючи формули (9) від формул (5), з яких випливає, що в тонкому шарі

$$(\tau_{xy})_o = 0, \quad \sigma_{y_0} = 0. \quad (10)$$

Залишкові напруження  $\sigma_{x_0}$  можна визначити за формулами

$$\frac{\sigma_{x_0}}{\sigma_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{1 - 16\mu^2 \frac{y^2}{H^2}} - \frac{\psi + P_c}{\sigma_s}, \quad \text{при } |y| \leq \frac{h_i}{2}, \quad (11)$$

$$\frac{\sigma_{x_0}}{\sigma_s} = \frac{\varphi(y) - P_c}{\sigma_s} = \frac{\varphi(y) + \psi}{\sigma_s} - \frac{\psi + P_c}{\sigma_s}, \quad \text{при } \frac{h_i}{2} \leq |y| \leq \frac{H}{2}. \quad (12)$$

Залишкові напруження  $\sigma_{x_0}$  безперервні на межах розділу пластично зміцненої та ідеально-пластичної частин, тобто  $y = \pm \frac{h}{2}$ . Це випливає з формул (8), (11) і (12).

В умовах плоского деформування

$$\sigma_z = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}, \quad (13)$$

де  $z$  – вісь, на якій деформація дорівнює нулю, тобто вісь, перпендикулярна до площини перерізу заготовки.

За теоремою про розвантаження, тобто методом, наведеним вище, наведені формули (11), (12), отримуємо, що залишкові напруження  $\sigma_{z_0}$  на цій осі дорівнюють

$$\sigma_{z_0} = \frac{\sigma_{x_0}}{2}. \quad (14)$$

Інтенсивність залишкових напружень позначається  $(\sigma_i)_0$ . Її можна визначити за формулою [4]

$$(\sigma_i)_0 = \frac{\sqrt{3}}{2} |\sigma_{x_0}|,$$

тобто розподіл інтенсивності залишкових напружень  $(\sigma_i)_0$  аналогічний розподілу модуля залишкових напружень  $|\sigma_{x_0}|$  відрізняється від нього тільки числовим множником.

Форма запису формул (11), (12) така, що залишкові напруження  $\sigma_{x_0}$  видаються ніби залежні від зусилля  $P_c$  на периферії деталі. Проте з формули (7) випливає, що сума  $\frac{\psi + P_c}{\sigma_s}$  не залежить від зусилля  $P_c$ , оскільки від нього не залежить ні один складник цієї формули разом з  $\frac{\phi(y) + \psi}{\sigma_s}$ .

З формули (7) бачимо, що в значення параметра  $\psi$  зусилля  $P_c$  входить від'ємний доданок, оскільки сума  $\frac{\phi(y) + \psi}{\sigma_s}$  не залежить від прикладеного до бойків зусилля  $P_c$ .

Тому різниця  $\phi(y) - P_c$  у формулі (12) є незалежною від зусилля на бойках. Це, в свою чергу, показує, що за умови  $\frac{h_i}{2} \leq |y| \leq \frac{H}{2}$  на залишкові напруження  $\sigma_{x_0}$  на границі зміцненого і пластичного шару не впливають початкові зусилля на бойках. З цього випливає, що залишкові напруження, визначені за формулами (10), (11), (12), фактично не залежать від початкового зусилля на бойках.

**Висновки.** Проведені дослідження підтверджують переваги використання для зміцнення деталей поверхневого пластичного деформування статико-імпульсною обробкою. Виведені залежності дають можливість встановлювати силові параметри процесу імпульсного зміцнення.

### Список використаної літератури

1. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.
2. Статико-импульсное упрочнение деталей передач [Текст] / Киричек А.В. и др. // Теория и практика зубчатых передач: труды международной конференции – Ижевск, 1998. – С. 363–368.
3. Упрочнение статико-импульсной обработкой ППД с использованием гидроударных устройств [Текст] / А.Г. Лазуткин и др. // Механизмы и машины ударного периодического и вибрационного действия: Материалы междунар. научного симпозиум. – Орел: ГТУ, 2000. – С. 318–320.
4. Упрочнение статико-импульсной обработкой сердечников крестовин стрелочных переводов [Текст] / А.Г. Лазуткин и др. // Автотракторостроение. Промышленность и высшая школа: Тезисы докл. XXVII науч.-техн. конф. – М.: ААИ, 1999. – С. 17 – 19.
5. Упрочнение статико-импульсной обработкой [Текст] / Лазуткин А.Г. и др. // Новые материалы и технологии в машиностроении и приборостроении: Материалы науч.-техн. конф. – Пенза, 1996. – С. 26–31.
6. Картанов, Л.В. Повышение долговечности деталей машин использованием материалов с регулярной гетерогенной структурой: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / Картанов Леонид Владимирович. – ВлГУ, 1997. – 170 с.
7. Киричек, А.В. Обеспечение качества несоосных винтовых механизмов деформационным упрочнением их сопрягаемых деталей: дис. ... докт. техн. наук [Текст] / Киричек Анатолий Владимирович. – М., 1999. – 394 с.

8. Применение деформационного упрочнения статико-импульсной обработкой для повешения контактной выносливости деталей [Текст] / Киричек А.В. и др. // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: Мат. Межд. науч.-техн. конф. – Ростов-на-дону, ДГТУ, 2008. – С. 16–20.
9. Дрозд, М.С. Определение механических свойств металлов без разрушения [Текст] / М.С. Дрозд. – М: Изд-во Металлургия, 1965. – 171 с.

*Отримано 05.10.2011*